Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 2, Summer 2023, p. 243-264

Morpho-physiological and Yield Responses of Quinoa Genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd) to the Application of Potassium and Zinc Chelates under Drought Stress Conditions

Y. Zahmatkesh[1], M. Pessarakli[2*], A. Souhani[3]

Received: 11-08-2022 Revised: 09-11-2022 Accepted: 27-11-2022	**How to cite this article:** Zahmatkesh, Y., Pessarakli, M., & Souhani darbani, A. (2023). Morpho-physiological and Yield Responses of Quinoa Genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd) to the Application of Potassium and Zinc Chelates under Drought Stress Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(2), 243-264. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78159.1191

Introduction

Since the development of crop cultivation and their yield depend on irrigation and since drought is one of the features of our country, one of the solutions to deal with these problems is the implementation of applied research in the field of stress-resistant plants cultivation such as quinoa. Also, considering the important role of potassium and zinc elements in the plant, providing a sufficient amount of these elements under drought stress can be effective in increasing the plant's resistance to this type of stress. Considering the genetic differences of plants and their different reactions in the face of environmental stress such as drought stress, and different fertilization of genotypes, it seems necessary to carry out this research to investigate the application of potassium and zinc chelates on the morpho-physiological and yield indicators of three quinoa genotypes under drought stress conditions in Razavi Khorasan climate.

Materials and Methods

This study was conducted to study the morpho-physiological and yield responses of three quinoa genotypes to foliar application of zinc and potassium chelates under drought stress conditions in a research educational farm - Faculty of Agriculture of Islamic Azad University, Mashhad branch located in Golbahar during two crop years 2018-19 and 2019-20. The experiment was a factorial split plot in the form of a basic randomized complete block design with three replications. Drought stress at four levels as the main plots (normal irrigation as a control treatment, 75% of crop capacity, 50% of crop capacity, and 25% of crop capacity) and as the sub-plots, the combination of quinoa cultivars at three levels (Q26, Q29, and Titicaca) and foliar spraying were tested at four levels (no foliar spraying as a control, 100% zinc chelate, 100% potassium chelate and 50% combination of zinc and potassium chelates). Planting was done in the middle of May in both years. To measure the photosynthetic pigments after 10% flowering, sampling was obtained from the young terminal leaves separately from each plot. Analysis of the obtained data was done using SAS 9.2 software. The mean comparison of the evaluated traits was done using Duncan's multiple range test at 5% probability level.

Results and Discussion

The growth and yield indicators and photosynthetic pigments decreased with the increase in stress intensity. Results also showed that the combined foliar spray treatment resulted in higher height, plant weight, number of seeds per spike, seed, and biological yield than other fertilizer treatments. Although different varieties had different reactions to different traits, the highest plant weight, number of seeds per spike, thousand seed weight, seed yield, and chlorophyll a and b were obtained in the Q26 variety. The highest plant height and biological yield were obtained in the Tricaca variety and combined foliar application under non-stressed conditions, and for

1- Ph.D. Student of Crop Physiology, Islamic Azad University, Damghan Branch, Iran
2- Professor, Department of Agriculture, University of Arizona, USA
3- Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Iran
(*- Corresponding Author Email: pessarklim@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78159.1191

plant weight, number of seeds per spike, seed yield, and chlorophyll b traits were observed in the G26 variety and combined foliar application under non-stressed conditions. Also, the highest amount of harvest index and chlorophyll *a* were obtained in the treatment without stress and Q26 variety and 100% Zn foliar application. On the other hand, the highest 1000 seeds weight and carotenoids were obtained in 100% K foliar application and Q26 and Tricaca cultivars under no stress, respectively. In the second year of the experiment, the growth and yield of the plant increased significantly compared to the first year under different levels of irrigation and also different levels of foliar spraying.

Conclusion

In general, in this experiment, the yield of the quinoa plant is reduced by reducing the amount of water consumed and as a result, the occurrence of drought stress, but with the use of foliar spraying, especially combined foliar spraying, the adverse effects of drought stress on the performance of this plant can be reduced to an optimal extent. It seems that in the region in question, the difference in rainfall and evaporation, and transpiration in the two years of the experiment had a significant effect on the studied traits so that in the first year compared to the second year, the limitation of water resources was more effective in reducing plant growth and yield. However, using appropriate amounts of combined and separate foliar spraying to increase the plant's ability to absorb water more effectively is a suitable method to increase the yield of different quinoa cultivars under drought stress.

Keywords: Biological yield, Crop capacity, Photosynthetic pigments, Seed yield

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲، ص ۲٦٤-۲٤۳

پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی و عملکردی ژنوتیپ‌های کینوا (*Chenopodium quinoa* **Willd**) به کاربرد کلات پتاس و روی تحت شرایط تنش خشکی

یاسر زحمتکش[۱]، محمد پسرکلی[۲*]، علیرضا سوهانی دربانی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

چکیده

به‌منظور مطالعه پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی و عملکردی سه ژنوتیپ کینوا به محلول‌پاشی کلات‌های روی و پتاسیم تحت شرایط تنش خشکی در مزرعه آموزشی پژوهشی- دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد واقع در گلبهار در طی دو سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. آزمایش به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. تنش خشکی در چهار سطح در کرت‌های اصلی (آبیاری معمول به‌عنوان تیمار شاهد، ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و در کرت‌های فرعی ترکیب تیماری ارقام گیاه کینوا در سه سطح (Q26، Q29 و Titicaca) و محلول‌پاشی در چهار سطح (عدم محلول‌پاشی به‌عنوان شاهد، کلات روی ۱۰۰ درصد، کلات پتاس ۱۰۰ درصد و ۵۰ درصد تلفیق کلات روی و پتاس) مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش بر میزان شاخص‌های رشدی و عملکردی و رنگیزه‌های فتوسنتزی کاسته شد. همچنین نتایج نشان داد تیمار محلول‌پاشی ترکیبی نسبت به دیگر تیمارها ارتفاع، وزن بوته، تعداد دانه، عملکرد دانه و بیولوژیک بیشتری داشتند. هرچند ارقام مختلف نسبت به صفات مختلف واکنش متفاوتی داشتند ولی بیشترین وزن بوته، تعداد دانه، وزن هزاردانه، عملکرد دانه و کلروفیل a و b در رقم Q26 به‌دست آمد. همچنین در سال دوم آزمایش در شرایط سطوح مختلف آبیاری و همین‌طور سطوح مختلف محلول‌پاشی رشد و عملکرد گیاه به‌طور قابل‌توجهی نسبت به سال اول افزایش داشت. به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت که کاربرد کودهای محلول‌پاشی توانست اثرات تنش خشکی را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، ظرفیت زراعی

مقدمه

گیاه کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa* Wild از خانواده Amaranthaceae و زیر خانواده Chenopodiaceae گیاهی شورزیست اختیاری، دارای دانه‌های خوراکی سرشار از پروتئین است (Jacobsen *et al.*, 2005; Adolf, Shabala, Andersen, Razzaghi, & Jacobsen, 2012). این گیاه مقاومت زیادی در برابر طیف گسترده‌ای از تنش‌های غیرزنده مانند سرما، شوری و خشکی از خود نشان می‌دهد و همچنین به خوبی قابلیت رشد در خاک‌های حاشیه‌ای را دارد (Jacobsen, Liu, & Jensen, 2009). این گیاه ۷ اسید آمینه ضروری دارد، سرشار از ویتامین و امگا ۹ می‌باشد. میزان اسید آمینه لیزین دانه‌های این گیاه بالاتر از گندم می‌باشد و برای تعادل غذایی انسان مطلوب می‌باشد کینوا از نظر سدیم فقیر بوده ولی از نظر کلسیم، فسفر، منیزیم، پتاسیم، آهن، مس، روی نسبت به گندم و جو ذرت برتری دارد. از نظر چربی و کربوهیدرات و ویتامین نیز از گندم غنی‌تر می‌باشد. کینوا حاوی مواد معدنی فوق‌العاده‌ای با خواص آنتی‌اکسیدانی می‌باشد (Jamali & Sharifan, 2018).

با توجه به کمبود آب و کاهش نزولات آسمانی، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های تولیدکنندگان محصولات کشاورزی عدم توانایی تامین آب مورد نیاز برای رشد گیاهان می‌باشد. تنش‌های محیطی اعم از زنده و غیرزنده همواره از عوامل اصلی کاهش تولید محصولات زراعی و از موانع اصلی رسیدن به پتانسیل عملکرد محصولات مختلف بوده‌اند. تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده‌ی تولید محصولات در

۱- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، ایران
۲- استاد گروه کشاورزی، دانشگاه آریزونا، آمریکا
۳- استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: pessarklim@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78159.1191

سیستم‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به حساب می‌آید (Abarshahr, Rabiei, & Samizadeh-Lahigi, 2011). تنش خشکی در حقیقت کاهش پتانسیل آب خاک است. در چنین شرایطی گیاه به‌منظور ادامه جذب آب، از طریق تجمع ترکیبات اسمزی از جمله کربوهیدرات محلول و پرولین، پتانسیل اسمزی خود را کاهش می‌دهد و به عبارت دیگر تنظیم اسمزی صورت می‌گیرد. در فرآیند تنظیم اسمزی، تورژسانس و فرایندهای وابسته به آن تحت شرایط کمبود آب ادامه می‌یابد. ازاین رو تنظیم اسمزی به توسعه سلولی و رشد گیاه در تنش آبی کمک می‌کند. تحمل به خشکی صفت پیچیده‌ای است که ظهور آن به عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های مرفولوژی، فیزیولوژی و بیوشیمیایی و برهمکنش بین آن‌ها بستگی دارد (Adebayo *et al.*, 2014).

مصرف پتاسیم می‌تواند مقاومت گیاهان را به خشکی افزایش دهد، چون این عنصر در فیزیولوژی و متابولیسم گیاه نه تنها از نظر مقدار موجود در بافت‌های گیاهی، بلکه از نظر وظایف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مهم‌ترین کاتیون است (Shekofteh & Dehghani Fatehabad, 2016). اگرچه پتاسیم در ساختار شیمیایی گیاه نقش ندارد، اما یکی از عناصر ضروری و مورد نیاز گیاه است و در بسیاری از فعالیت‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی نقش اساسی داشته و در حفظ پتانسیل اسمزی و جذب آب موثر است. کوددهی با استفاده از کودهای پتاسیم موجب افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های کم‌آبی و شوری شده و سطح تحمل آن‌ها را نسبت به آفات و بیماری‌های مختلف بالا می‌برد (Shekofteh & Dehghani Fatehabad, 2016).

عناصر کم‌مصرف برای رشد طبیعی گیاهان مورد نیاز هستند و ضمن شرکت در ساختار بعضی از اندامک‌ها، در بسیاری از واکنش‌های بیوشیمیایی دخالت دارند (Ravi, Channal, Hebsur, Patil, & Dharmatti, 2008). عنصر کم‌مصرف روی تأثیر زیادی در کاهش اثرات سوء تنش خشکی در گیاهان زراعی دارند. با کاهش میزان رطوبت خاک، تحرک عناصر روی و آهن در خاک کاهش یافته و با توجه به محدودیت رشد ریشه، گیاه به‌طور فزاینده‌ای با کمبود این عناصر مواجه می‌گردد (Jalil Shesh Bahre & Movahedi Dehnavi, 2012). در پژوهشی محققان گزارش کردند که محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف مانند آهن و روی در شرایط تنش خشکی عملکرد آفتابگردان را با بهبود بازده فتوشیمیایی و غلظت سبزینه، افزایش داد (Babaeian, Heidari, & Ghanbari, 2008). علاوه بر آن گزارش شده است که، روی میزان فتوسنتز و دوام سطح برگ را افزایش می‌دهد و در نتیجه آن میزان تولید آسمیلات‌ها افزایش می‌یابد (Yousefi, 2012).

از آنجا که توسعه کشت محصولات زراعی و میزان عملکرد آن به آبیاری وابسته است و با توجه به این‌که خشکی از ویژگی‌های بارز کشور ما به حساب می‌آید، یکی از راهکارهای مقابله با این مشکلات، اجرای تحقیقات کاربردی در زمینه کشت و کار گیاهان مقاوم به تنش همچون کینوا می‌باشد. همچنین با توجه به نقش مهم عنصر پتاسیم و روی در گیاه، فراهم ساختن مقدار کافی از این عناصر در شرایط تنش خشکی، می‌تواند در افزایش مقاومت گیاه به این نوع تنش موثر واقع گردد. با توجه به تفاوت‌های ژنتیکی گیاهان و واکنش‌های متفاوت آن‌ها در مواجه با تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی، و کودپذیری متفاوت ژنوتیپ‌ها، انجام این پژوهش با هدف بررسی کاربرد کلات‌های پتاسیم و روی بر شاخص‌های مورفو-فیزیولوژیکی و عملکردی سه ژنوتیپ کینوا تحت شرایط تنش خشکی در اقلیم خراسان رضوی ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور مطالعه پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی و عملکردی سه ژنوتیپ کینوا به محلول‌پاشی کلات‌های روی و پتاسیم تحت شرایط تنش خشکی در مزرعه آموزشی پژوهشی- دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد واقع در گلبهار (با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳ دقیقه و عرض جغرافیایی ۸۰ درجه و ۸۴ دقیقه) در طی دو سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک بوده و بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مشهد که در فاصله سه کیلومتری این مزرعه قرار دارد میانگین حرارت سالانه آن حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالیانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد میانگین دمای گرم‌ترین ماه سال ۲۶/۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین سردترین ماه سال ۱/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. داده‌های هواشناسی طی دوره اجرای پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. قبل از اجرای آزمایش، به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، از خاک مزرعه نمونه‌برداری شد (جدول ۲).

آزمایش به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. تنش خشکی در چهار سطح در کرت‌های اصلی (آبیاری معمول به‌عنوان تیمار شاهد، ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و در کرت‌های فرعی ترکیب تیماری ارقام گیاه کینوا در سه سطح (q26، q29 و Titicaca) و محلول‌پاشی در چهار سطح (عدم محلول‌پاشی به‌عنوان شاهد، کلات روی ۱۰۰ درصد، کلات پتاس ۱۰۰ درصد و ۵۰ درصد تلفیق کلات روی و پتاس) مورد آزمایش قرار گرفت. هر کرت شامل شش ردیف کاشت و با فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر و طول سه متر در نظر گرفته شد. بین کرت‌های اصلی چهار ردیف نکاشت در نظر گرفته شد.

جدول ۱- آمار هواشناسی (ماهانه) ایستگاه سینوپتیک مشهد طی دوره آزمایش در سال‌های ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸

Table 1- Meteorological statistics (monthly) of Mashhad Synoptic Station during the experimental period in 2018-19 and 2019-20

Month	میزان بارندگی Rainfall (mm)		دمای حداقل T_{Min} (°C)		دمای حداکثر T_{Max} (°C)		ساعات آفتابی Sunshine duration	
	2018-19	2019-20	2018-19	2019-20	2018-19	2019-20	2018-19	2019-20
September	2.32	0.12	11.6	9.7	26.2	24.6	9.25	8.84
October	17.85	6.3	4.01	7.3	15.4	22.7	5.52	8.02
November	8.37	2.56	1.47	-0.13	12	12.01	5.1	5.99
December	5.4	44.97	-0.96	-0.03	8.92	13.5	4.84	5.94
January	6.8	22.96	0.54	-0.69	11.98	12.02	6.49	6.06
February	41.53	54.93	4.72	7.5	16.7	17.5	6.49	4.38
March	32.9	37.75	6.88	8.98	16.65	20.6	5.25	5.62
April	37.37	41.86	13.75	12.9	25.5	25.9	8.30	7.76
May	0.5	18.11	19.06	18.2	35.4	32.8	12.6	10.94
June	4.03	0.01	20.74	22.7	34.7	37.8	11.64	12.59
July	0.3	0	20.79	21.3	34.7	35.3	11.60	11.91
August	0.21	0.11	15.16	15.6	29.7	31.2	10.67	10.67

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی (۳۰-۰) سانتی‌متری

Table 2- Selected properties of the top soil (0-30 cm) of the experimental site

Year	N (%)	P (mg kg^{-1})	K (mg kg^{-1})	Organic matter (%)	EC (dS m^{-1})	pH
2018-19	0.06	12.6	256	0.58	2.22	7.2
2019-20	0.05	12.1	248	0.56	2.20	7.2

فاصله بین هر دو بلوک هم دو متر بود. کاشت در هر دو سال در اواسط اردیبهشت ماه صورت گرفت. پس از کشت بلافاصله آبیاری به روش آبیاری قطره‌ای و با استفاده از لوله‌های تیپ انجام و برای اطمینان از سبز شدن مطلوب بذور آبیاری هفت روز بعد تکرار شد. در مرحله دو تا هشت برگی، بوته‌های اضافی تنک شدند.

برای اعمال تنش خشکی، ابتدا ظرفیت زراعی مزرعه تعیین شد. برای این کار، کرتی به ابعاد ۲×۲ m تهیه و به‌طور کامل از آب پر شد. سپس روی آن با پلاستیک محصور تا خاک کاملاً اشباع شد. پس از مدت ۲۴ ساعت که آب موجود در خلل و فرج‌های درشت خاک توسط نیروی ثقل خارج شد، پلاستیک برداشته شد. در این هنگام، نمونه‌ای از خاک تهیه، پس از توزین در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. سپس نمونه را با ترازوی دقیق وزن و میزان رطوبت تبخیر شده محاسبه شد (Ghavamsaeidi noghabi, Shahidi, & Homami, 2021).

به‌منظور تعیین درصد رطوبت وزنی خاک در هنگام ظرفیت زراعی از رابطه (۱) استفاده شد.

$$W_m=W_2-W_1/W_1\times100 \quad (۱)$$

که در این رابطه، W_m: رطوبت وزنی خاک (درصد)، W_2: وزن خاک مرطوب (گرم)، W_1: وزن خاک خشک (گرم) می‌باشد.

جهت اعمال تیمار آبیاری، حجم آب مصرفی مورد نیاز از طریق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$V = ((FC - \theta m)\times Pb\times D_{root} \times A)/Ei \quad (۲)$$

که در این رابطه، V: حجم آب آبیاری بر حسب مترمکعب، FC: درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی، θm: درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری، Pb: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، D_{root}: عمق توسعه ریشه بر حسب متر، A: مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع، E_i: راندمان آبیاری می‌باشد. محلول‌پاشی کلات‌های پتاسیم و روی (از منبع کودهای کلاته شرکت خضراء با غلظت توصیه شده شرکت سازنده که به‌ترتیب برای ۱۰ و ۳ در هزار برای پتاسیم و روی خواهد بود) در دو مرحله‌ی ۱۰ و ۱۵ برگی و پس از اعمال تنش خشکی انجام شد.

بعد از اعمال تیمارهای آزمایش، برای اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی بعد از مرحله گلدهی نمونه‌گیری از برگ‌های جوان انتهایی به‌منظور اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی جداگانه از هر کرت انجام شد. میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها به روش آرنون (Arnon, 1967) اندازگیری شدند. در این روش مقدار ۰/۵ گرم از ماده تر گیاهی را در هاون ریخته و سپس توسط نیتروژن مایع خرد شدند. ۲۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد را به نمونه اضافه کرده و در دستگاه سانتریفیوژ ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ده دقیقه قرار داده شد. عصاره فوقانی جدا شده حاصل از سانتریفیوژ به بالن شیشه‌ای منتقل شد. مقداری از نمونه داخل بالن را در کووت اسپکتروفتومتر ریخته و سپس به‌طور جداگانه در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a، ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b و ۴۷۰ نانومتر برای کارتنوئیدها، مقدار جذب قرائت شد.

Chlorophyll a = (19/3 ×A663-0/86×A645) V/100W
Chlorophyll b = (19/3×A645-3/6×A663) V/100W
Carotenoids = 100(A470)-3/27(mg chl a)-104(mg chl b)/227
Chlorophyll stability index= (Total Chl under stress/ Total Chl under control) ×100

V= حجم محلول صاف‌شده (محلول فوقانی حاصل از سانتریفیوژ)

A= جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر

W= وزن تر نمونه بر حسب گرم

به‌منظور اندازه‌گیری صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد شامل ارتفاع بوته (متر)، سطح برگ (Leafarea meter)، وزن خشک اندام هوایی (بعد از خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون با استفاده از ترازو)، تعداد دانه در خوشه و وزن هزاردانه (ترازو) تعداد سه بوته در هر کرت به‌صورت تصادفی انتخاب و صفات فوق بر روی آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. جهت اندازه‌گیری عملکرد در واحد سطح، عملکرد بیولوژیک و محاسبه شاخص برداشت (عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک در ۱۰۰)، پس از حذف یک متر از ابتدا و انتهای هر کرت، کل گیاهان ۲ ردیف میانی برداشت شدند و وزن خشک کل بوته‌ها (بعد از خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون با استفاده از ترازو) به همراه وزن دانه ثبت شد.

تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار 9.2 SAS انجام شد. مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

خصوصیات رویشی

ارتفاع بوته: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی تنش خشکی، محلول‌پاشی، رقم ($p \leq 0.01$) و برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم، سال × محلول‌پاشی ($p \leq 0.01$) و سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم، سال × تنش خشکی × رقم ($p \leq 0.01$) و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی صفت ارتفاع بوته معنی‌دار بودند (جدول ۳). نتایج نشان داد در تمام ارقام، هرچند محلول‌پاشی باعث باعث افزایش ارتفاع بوته شد ولی با افزایش شدت تنش بر میزان این شاخص کاسته شد. بیشترین میزان این شاخص در شرایط بدون تنش و رقم Tircace و در حضور محلول‌پاشی ترکیبی 50 K+ Zn به‌دست آمد که نسبت به کمترین میزان این شاخص که در تیمار تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و رقم Q26 و عدم استفاده از کود به میزان ۶۷ سانتی‌متر دارای ارتفاع بوته بیشتری بود (جدول ۵).

وزن بوته: تجزیه واریانس صفات نشان داد اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و همچنین برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سال × محلول‌پاشی و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم و همچنین سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی و اثر سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی وزن بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد در سال دوم آزمایش نسبت به سال اول وزن بوته بیشتری به‌دست آمد (جدول ۴). ارقام مختلف نسبت به تنش خشکی و محلول‌پاشی واکنش متفاوتی داشتند. هرچند محلول‌پاشی اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داد ولی با افزایش شدت تنش بر میزان شاخص وزن بوته کاسته شد. بیشترین میزان وزن بوته در شرایط عدم تنش و محلول‌پاشی ترکیبی در رقم Q26 به‌دست آمد و کمترین میزان این شاخص در تیمار تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی k 100 در رقم Q29 حاصل شد (جدول ۶).

شاخص سطح برگ: تجزیه واریانس صفات نشان داد اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی، تنش خشکی × محلول‌پاشی، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سال × محلول‌پاشی و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم، سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی و سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی شاخص سطح برگ معنی‌دار بود. نتایج نشان داد سال دوم آزمایش نسبت به سال اول به میزان ۱۳ درصد شاخص سطح برگ بیشتری تولید کرد (جدول ۴). نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش بر شاخص سطح برگ کاسته شد. بیشترین میزان این شاخص در تیمار ۱۰۰ درصد و Zn 100 و رقم Q29 به‌دست آمد و کمترین میزان این شاخص در ظرفیت زراعی ۵۰ درصد و محلول‌پاشی k 100 و رقم Q29 گزارش شد (جدول ۷).

دلیل اصلی تفاوت بین سال‌های آزمایشی از نظر تأثیر بر صفات مورد بررسی در این آزمایش را می‌توان شرایط متغیر آب و هوایی به‌ویژه در طول دوره رشد و نمو گیاهان ذکر نمود. آمار هواشناسی دوره مذکور درطول سال‌های آزمایشی در جدول ۱ آمده است. با در نظر گرفتن این‌که در سال دوم آزمایش (۲۳۰ میلی‌متر) میزان بارندگی بیش از سال اول آزمایش بود بنابراین برتر بودن اکثر صفات مورد بررسی در سال دوم منطقی به نظر می‌رسد. در سال اول آزمایش کاهش میزان بارندگی و افزایش دما در این سال و همچنین اعمال تنش خشکی بر شدت کاهش آب دسترس افزود. از طرف دیگر، با توجه به این‌که ارقام کینوا از نظر مراحل مختلف فنولوژیکی دارای تفاوت می‌باشند و از خصوصیات رشد و حجم بوته متفاوتی برخوردارند

لذا می‌توان گفت این ارقام در شرایط تنش و عدم تنش از لحاظ خصوصیات رشدی ارتفاع و سطح برگ با هم تفاوت دارند. نتایج آزمایشات کشتکار و همکاران (Keshtkar, Aien, Naghavii, & Najafi Nezhad, 2021) بر روی ارقام مختلف کینوا در شرایط تنش خشکی و محلول‌پاشی جاسمونیک اسید نشان داد ارقام از نظر خصوصیات رویشی دارای تفاوت چشمگیری می‌باشند.

خادمیان و همکاران (Khademian, Ghassemi, & Asghari, 2019) در آزمایش خود گزارش دادند که اثر متقابل تیمارهای محلول‌پاشی در تنش کمبود آب بر ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ و در نهایت وزن بوته گلرنگ معنی‌دار بود، به‌طوری که بیشترین خصوصیات رویشی گلرنگ در تیمار بدون تنش به همراه استفاده از محلول‌پاشی کود پتاسه حاصل گردید. از اولین نشانه‌های کمبود آب، کاهش فشار آماس و در نتیجه کاهش رشد و توسعه سلول به‌ویژه در ساقه و برگ‌هاست (Parkash & Singh, 2020). با کاهش رشد سلول، اندازه اندام محدود می‌شود و به همین دلیل اولین اثر محسوس کم آبی بر گیاهان را می‌توان با توجه اندازه کوچک‌تر برگ‌ها و ارتفاع کمتر گیاهان تشخیص داد. ارتفاع بوته مانند هر اندام رویشی یا زایشی دیگر شدیداً تحت تاثیر عناصر غذایی و آب قرار می‌گیرد. دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی کافی، به‌خصوص پتاسیم در افزایش خصوصیات رویشی گیاه بسیار موثر می‌باشد (Campelo, Teixeira, Moreira, & Lacerda, 2019).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک، اجزای عملکرد و عملکرد کینوا تحت تاثیر تیمارهای مختلف

Table 3- Variance analysis of morphological traits, yield components, and yield of quinoa under the influence of different treatments

منابع تغییر Source of Variation	**درجه آزادی d.f**	**میانگین مربعات (Mean square)**							
		ارتفاع بوته Plant height	**وزن بوته Plant weight**	**شاخص سطح برگ LAI**	**تعداد دانه در خوشه Number of seeds per spike**	**وزن هزاردانه Weight of 1000 seeds**	**عملکرد دانه Seed yield**	**عملکرد بیولوژیک Biological yield**	**شاخص برداشت Harvest index**
سال (Year) (Y)	1	41.6^{ns}	1043**	2.54**	6693531**	6.01**	3579123**	42540422**	1120**
خطای سال (Rep year)	4	329	431	0.51	370232	0.031	53295	3296870	463
تنش خشکی (Irrigation regime) (S)	3	9459**	2859**	2.47**	5725275**	0.836**	6340835**	16442638**	861**
Y * S	3	3582**	18.9**	0.01^{ns}	332928^{ns}	0.032*	92762*	292128^{ns}	134*
خطای Rep S (Y)	12	80.5	21.4	0.02	364529	0.019	34393	99592	43.5
محلول پاشی (Foliar spray) (F)	3	4252**	872**	2.76**	5986109**	0.201**	4220124**	18528713**	500**
رقم (Cultivar) (C)	2	694.2**	2751**	3.23**	6430022**	2.57**	520538**	1006304**	77.3^{ns}
S * F	9	92.7^{ns}	3716**	3.04**	1544350**	0.990**	88779**	1875758**	469**
S * C	6	325**	1448**	11.7**	13776340**	3.73**	660862**	4165889**	597**
F *C	6	834**	173**	3.36**	1355946**	1.03**	156632**	2721701**	301**
S * F * C	18	351**	741**	4.20**	1899775**	0.795**	94269**	2319243**	446**
Y * F	3	2575**	195**	3.09**	620091*	0.018^{ns}	865600**	5233655**	164*
Y * C	2	46.1^{ns}	27.9^{ns}	0.02^{ns}	307422^{ns}	0.104**	92025**	11090^{ns}	318**
Y * S * F	9	62.3^{ns}	1244**	5.20**	1197649**	0.167**	270651**	2769524**	437**
Y * S * C	6	459**	8.46^{ns}	0.05^{ns}	122179^{ns}	0.047**	713875**	82091^{ns}	636**
Y * F * C	6	19.3^{ns}	2937**	1.99**	1988590**	0.115**	205849**	5563628**	874**
Y * S * F * C	18	158**	2529**	2.09**	821012**	0.119**	160238**	3280208**	173**
خطای کل (Total error)	176	62.7	15.3	0.03	193425	0.010	16436	110934	43.2
ضریب تغییرات (Coefficient of variation)		10.3	12.9	10.4	10.3	4.3	8.8	9.9	14.6

**، * و ns به‌ترتیب بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشند.

ns, *, **: non-significant, significant at $p = 0.05$ and $p = 0.01$, respectively

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر اصلی سال بر صفات مختلف

Table 4- Comparison of the average main effect of the year on different traits

سال Year	وزن بوته Plant weight (g)	شاخص سطح برگ LAI	تعداد دانه در خوشه Number of seeds per spike	وزن هزاردانه Weight of 1000 seeds	عملکرد دانه Seed yield ($kg.ha^{-1}$)	عملکرد بیولوژیک Yield Biological ($kg.ha^{-1}$)	شاخص برداشت Harvest index (%)
2018-19	28.4^{b}	1.47^{b}	4121^{a}	2.21^{b}	1339^{b}	2992^{b}	47.0^{a}
2019-20	32.2^{a}	1.66^{a}	4426^{b}	2.50^{a}	1562^{a}	3760^{a}	43.0^{b}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p \leq 0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۵- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر ارتفاع بوته گیاه کینوا

Table 5- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa plant height

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	ارتفاع بوته Plant height (cm)	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	ارتفاع بوته Plant height (cm)
FC 25	Control	Tircace	66.6^{o-t}	FC 75	Control	Tircace	86.9^{e-g}
		Q29	55.7^{uv}			Q29	56.0^{uv}
		Q26	38.8^{w}			Q26	76.5^{g-o}
	100 K	Tircace	73.5^{i-q}		100 K	Tircace	83.5^{e-j}
		Q29	71.2^{k-r}			Q29	79.4^{f-l}
		Q26	72.5^{j-q}			Q26	86.7^{e-g}
	100 Zn	Tircace	61.2^{r-u}		100 Zn	Tircace	76.5^{g-o}
		Q29	60.2^{s-u}			Q29	86.2^{e-g}
		Q26	58.6^{tu}			Q26	74.5^{h-p}
	50 K+ Zn	Tircace	64.3^{p-u}		50 K+ Zn	Tircace	97.8^{a-d}
		Q29	69.4^{l-s}			Q29	81.2^{f-k}
		Q26	76.7^{g-o}			Q26	93.6^{c-e}
FC 50	Control	Tircace	78.1^{f-m}	FC 100	Control	Tircace	84.9^{e-h}
		Q29	46.6^{vw}			Q29	80.6^{f-k}
		Q26	65.0^{p-u}			Q26	80.4^{f-k}
	100 K	Tircace	74.5^{h-p}		100 K	Tircace	81.0^{f-k}
		Q29	68.0^{m-t}			Q29	99.1^{a-c}
		Q26	84.0^{e-i}			Q26	94.3^{b-e}
	100 Zn	Tircace	67.0^{n-t}		100 Zn	Tircace	87.2^{e-g}
		Q29	77.7^{f-n}			Q29	84.6^{e-h}
		Q26	63.5^{q-u}			Q26	92.2^{c-e}
	50 K+ Zn	Tircace	88.4^{d-f}		50 K+ Zn	Tircace	105.5^{a}
		Q29	71.0^{k-r}			Q29	104.0^{ab}
		Q26	83.4^{e-j}			Q26	92.5^{c-e}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p \leq 0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

اگرچه پتاسیم در ساختمان هیچ‌کدام از ترکیبات مهم گیاهی مانند پروتئین‌ها، چربی‌ها و قندها شرکت ندارند، اما به‌عنوان مهم‌ترین فعال‌کننده آنزیم‌های گیاهی نقش مهمی در ساخته شدن این ترکیبات دارد. پتاسیم در فعال کردن آنزیم‌های احیاکننده گاز کربنیک نقش مهمی ایفا می‌کند. به همین دلیل کمبود آن باعث کاهش سوخت و ساز گیاه شده، در نتیجه رشد اندام هوایی، سطح برگ و در ادامه وزن بوته کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، برخی از پژوهشگران به نقش پتاسیم به‌عنوان یک عامل ایجادکننده فشار اسمزی و سهیم در تورم سلولی و موثر بر توسعه سلول اشاره کرده و تاکید کرده‌اند که حضور این عنصر برای توسعه برگ و رشد اندام هوایی گیاه ضروری است (Azizabadi, Golchin, & Delavar, 2014). از طرف دیگر، استفاده از عنصر روی با توجه به تاثیر بر ساخت کلروفیل و افزایش تنظیم‌کننده‌های رشد، سبب افزایش فتوسنتز برگ‌ها شده که باعث افزایش خصوصیات رویشی ارتفاع، وزن بوته و سطح برگ شده است.

در پژوهشی علت بهبود ارتفاع گیاه ذرت (*Zea mays*) محلول‌پاشی‌شده با روی، بهبود فتوسنتز عنوان شد (Lamochi & Sakinejad, 2019). به نظر می‌رسد که اختلاف ارتفاع، وزن بوته و سطح برگ گیاه بین تیمارها را می‌توان به تأثیر مثبت محلول‌پاشی در بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاهان در شرایط تنش مرتبط دانست. در واقع محلول‌پاشی با بهبود رشد گیاه به کاهش اثرات منفی تنش خشکی کمک کرد (Azab, 2016).

جدول ٦- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر ارتفاع بوته گیاه کینوا

Table 6- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa plant weight

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	ارتفاع بوته Plant weight (g)	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	ارتفاع بوته plant weight (g)
FC 25	Control	Tircace	31.5^{g-i}	FC 75	Control	Tircace	59.8^{b}
		Q29	14.6^{o-q}			Q29	34.3^{fg}
		Q26	5.69st			Q26	26.8^{i-l}
	100 K	Tircace	25.3^{j-m}		100 K	Tircace	31.8^{f-i}
		Q29	3.64^{t}			Q29	30.4^{g-j}
		Q26	24.3^{lm}			Q26	29.8^{g-k}
	100 Zn	Tircace	66.1^{a}		100 Zn	Tircace	31.3^{g-i}
		Q29	47.9^{e}			Q29	12.7^{p-r}
		Q26	23.4^{lm}			Q26	14.7^{o-q}
	50 K+ Zn	Tircace	26.5^{i-l}		50 K+ Zn	Tircace	29.9^{g-k}
		Q29	3.69^{t}			Q29	30.5^{g-j}
		Q26	17.9^{no}			Q26	31.0^{g-i}
FC 50	Control	Tircace	21.2^{mn}	FC 100	Control	Tircace	15.7^{op}
		Q29	16.2^{op}			Q29	10.5^{qr}
		Q26	33.9^{fg}			Q26	36.7^{f}
	100 K	Tircace	32.8^{f-h}		100 K	Tircace	54.0^{cd}
		Q29	28.0^{h-l}			Q29	51.2^{de}
		Q26	25.2^{j-m}			Q26	59.3^{b}
	100 Zn	Tircace	24.8^{k-m}		100 Zn	Tircace	25.6^{j-m}
		Q29	9.31^{rs}			Q29	12.8^{p-r}
		Q26	56.9^{bc}			Q26	31.5^{g-i}
	50 K+ Zn	Tircace	31.7^{f-i}		50 K+ Zn	Tircace	49.6^{de}
		Q29	28.4^{h-l}			Q29	56.2^{bc}
		Q26	24.1^{lm}			Q26	64.7^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

اجزای عملکرد

تعداد دانه در خوشه: با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و همچنین برهمکنش دوگانه سال × محلول‌پاشی ($p \leq 0.05$)، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سال × محلول‌پاشی و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم و همچنین سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی و اثر × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی تعداد دانه در خوشه معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد در سال دوم آزمایش نسبت به سال اول به میزان ۷ درصد تعداد دانه در خوشه بیشتری به‌دست آمد (جدول ۴). هرچند ارقام در شرایط سطوح مختلف تنش و محلول‌پاشی واکنش متفاوتی داشتند ولی با افزایش تنش خشکی بر میزان این شاخص کاسته شد، هرچند استفاده از محلول‌پاشی اثرات شدید تنش خشکی را تعدیل کرد. نتایج نشان داد بیشترین میزان این شاخص در شرایط ظرفیت زراعی صددرصد و محلول‌پاشی ترکیبی و رقم Q26 به‌دست آمد و نسبت به تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی Zn 100 و رقم Tircace به میزان ۱۵۶ درصد تعداد دانه در خوشه بیشتری را دارا بود (جدول ۸).

وزن هزاردانه: تجزیه واریانس صفات نشان داد اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و همچنین برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی ($p \leq 0.05$)، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سال × رقم و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم و همچنین سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی، سال × تنش خشکی × رقم و اثر سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی وزن بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد در

سال دوم نسبت به سال اول آزمایش به میزان ۱۴ درصد وزن هزاردانه بیشتری را دارا بود (جدول ۴). مقایسه میانگین صفات نشان داد استفاده از محلول‌پاشی در شرایط عدم تنش به‌طور چشمگیری باعث بهبود وزن هزاردانه شد. با افزایش شدت تنش بر میزان وزن هزاردانه کاسته شد. بیشترین میزان این شاخص در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و k 100 و رقم Q26 به‌دست آمد و کمترین میزان این شاخص در ظرفیت زراعی ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی k 100 و رقم Tircace گزارش شد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۱۲۰ درصد می‌باشد (جدول ۹).

جدول ۷- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر شاخص سطح برگ گیاه کینوا

Table 7- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa LAI

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	شاخص سطح برگ LAI
FC 25	Control	Tircace	1.51^{l-p}
		Q29	0.451^{wx}
		Q26	1.49^{m-p}
	100 K	Tircace	1.84^{h-j}
		Q29	1.61^{k-o}
		Q26	1.27^{qr}
	100 Zn	Tircace	1.16^{r}
		Q29	0.68^{s-v}
		Q26	2.07^{fg}
	50 K+ Zn	Tircace	1.75^{i-k}
		Q29	1.53^{l-p}
		Q26	1.26^{qr}
FC 50	Control	Tircace	4.16^{b}
		Q29	0.269^{x}
		Q26	0.673^{t-v}
	100 K	Tircace	2.47^{e}
		Q29	1.47^{m-q}
		Q26	0.744^{s-u}
	100 Zn	Tircace	1.72^{i-l}
		Q29	0.556^{u-w}
		Q26	0.630^{u-w}
	50 K+ Zn	Tircace	2.69^{d}
		Q29	1.62^{k-o}
		Q26	0.715^{s-u}
FC 75	Control	Tircace	0.482^{vw}
		Q29	1.15^{r}
		Q26	1.54^{k-p}
	100 K	Tircace	1.44^{n-q}
		Q29	0.771^{s-u}
		Q26	2.14^{fg}
	100 Zn	Tircace	0.853^{st}
		Q29	1.39^{pq}
		Q26	1.65^{j-n}
	50 K+ Zn	Tircace	1.41^{o-q}
		Q29	0.734^{s-u}
		Q26	2.26^{f}
FC 100	Control	Tircace	0.891^{s}
		Q29	1.67^{i-m}
		Q26	1.09^{r}
	100 K	Tircace	2.45^{e}
		Q29	1.96^{gh}
		Q26	2.08^{fg}
	100 Zn	Tircace	0.852^{st}
		Q29	4.57^{a}
		Q26	2.90^{c}
	50 K+ Zn	Tircace	2.45^{e}
		Q29	1.86^{hi}
		Q26	2.18^{f}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

یکی از دلایل مؤثر در کاهش اجزای عملکرد در رژیم‌های کم‌آبیاری، کاهش دوره گرده‌افشانی و نتیجتاً کاهش تعداد دانه می‌باشد. در واقع با کاهش رطوبت و تنش خشکی طی مراحل زایشی، جوانه‌های مولد گل تحت تأثیر خشکی قرار گرفته و ریزش گل‌ها باعث کاهش تشکیل خوشه می‌شود. در گزارش فرخیان و همکاران (Farokhian, Tohidi-Nejad, & Mohammadi-Nejad, 2021) مشاهده شد که تیمار محلول‌پاشی کودهای پتاسه بیشترین تعداد غلاف در بوته کنجد (*Sesamum indicum*) را تولید نمود. این محققان گزارش دادند که در بررسی برهمکنش عامل محلول‌پاشی و تنش خشکی بیشترین تعداد غلاف در بوته در تیمار محلول پتاسه در تیمار آبیاری کامل و کمترین تعداد غلاف در بوته در تیمار بدون محلول‌پاشی در تیمار عدم آبیاری به‌دست آمد (Farokhian *et al.*, 2021). هرچه آب آبیاری بیشتر شود و به‌همراه آن نیز سطوح متعادل ترکیبات کودی جهت محلول‌پاشی به‌کار رود، گیاه دارای کانوپی بزرگتری می‌شود که قادر است مخزن زایشی بزرگتری را نیز تغذیه نماید و به‌میزان کافی ماده خشک به آن اختصاص دهد (Casamali, van Iersel, & Chavez, 2021)، در نتیجه تعداد خوشه و به دنبال آن تعداد دانه در خوشه افزایش می‌یابد. صالحی‌نیا (Salehinia, 2019) نیز در آزمایش خود بیشترین تعداد دانه در خوشه گیاه ارزن را در تیمار محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و آبیاری گزارش دادند. با انجام آبیاری معمول به همراه تغذیه عناصر ماکرو و میکرو، تسهیم و تخصیص مواد فتوسنتزی به گل‌ها و دانه‌ها نسبت به شرایط تنش خشکی و عدم استفاده از کود بهتر بوده و باعث حفظ تعداد خوشه در بوته شده است. این نتایج نشان‌دهنده‌ی آسیب‌پذیری این صفت از عامل تنش خشکی و کمک محلول‌پاشی به بهبود این شرایط می‌باشد. از طرف دیگر، در شرایط تنش فوسنتز گیاه در واحد سطح

برگ به دلیل بسته شدن روزنه‌های برگ و کاهش سرعت تبادل دی‌اکسید کربن و محدودیت گسترش برگ‌ها، کاهش می‌یابد (Verma *et al.*, 2020) و این امر منجر به کاهش مولفه‌های پر شدن دانه می‌گردد. اختلال در انتقال کربوهیدارت‌ها می‌تواند مهم‌ترین دلیل کاهش وزن دانه در این شرایط باشد. همچنین وزن دانه به مقدار زیادی وابسته به دوره پر شدن دانه است و تنش‌های محیطی موجب کوتاه شدن طول دوره پرشدن دانه می‌شوند و بنابراین منجر به کاهش وزن دانه می‌گردند (Giunta, Mefleh, Pruneddu, & Motzo, 2021). اما محققان اظهار داشتند در چنین شرایطی کاربرد محلول‌پاشی و بنابراین تولید هورمون‌های محرک رشد و افزایش قابلیت دسترسی به عناصر غذایی و آب با افزایش طول دوره رشدی گیاه امکان تداوم بیشتر دوره پر شدن دانه را فراهم می‌سازند (Seyed Sharifi, Namvar, & Seyed Sharifi, 2017). بابائی و همکاران (Babaei, Seyed Sharifi, Pirzad, & Khalilzadeh, 2017) نیز علت افزایش حداکثر وزن دانه گندم را در شرایط کاربرد محلول‌پاشی عناصر میکرو و ماکرو بهبود وضعیت ریشه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و همچنین افزایش محتوای کلروفیل نسبت دادند (Babaei *et al.*, 2017).

جدول ۸- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر تعداد دانه در خوشه گیاه کینوا

Table 8- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Number seeds per spike

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	تعداد دانه در خوشه Number of seeds per spike	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	تعداد دانه در خوشه Number of seeds per spike
FC 25	Control	Tircace	3025^{r-t}	FC 75	Control	Tircace	4977^{d-h}
		Q29	3656^{n-q}			Q29	3365^{q-s}
		Q26	3641^{n-g}			Q26	4426^{h-l}
	100 K	Tircace	2845^{st}		100 K	Tircace	4782^{e-j}
		Q29	3961^{l-q}			Q29	4319^{i-m}
		Q26	4849^{e-i}			Q26	3436^{p-r}
	100 Zn	Tircace	2504^{t}		100 Zn	Tircace	4883^{e-i}
		Q29	4802^{e-j}			Q29	3894^{l-q}
		Q26	5718^{b}			Q26	3558^{p-r}
	50 K+ Zn	Tircace	3621^{o-q}		50 K+ Zn	Tircace	5514^{b-d}
		Q29	4340^{i-m}			Q29	3980^{k-q}
		Q26	4344^{i-m}			Q26	5024^{c-g}
FC 50	Control	Tircace	3380^{q-s}	FC 100	Control	Tircace	3702^{n-q}
		Q29	3642^{n-q}			Q29	3427^{p-r}
		Q26	3902^{l-q}			Q26	5106^{c-f}
	100 K	Tircace	4585^{f-k}		100 K	Tircace	5601^{bc}
		Q29	5246^{b-e}			Q29	3673^{n-q}
		Q26	4172^{k-o}			Q26	5498^{b-d}
	100 Zn	Tircace	4355^{i-m}		100 Zn	Tircace	4456^{g-l}
		Q29	5045^{c-f}			Q29	4035^{k-p}
		Q26	3449^{p-r}			Q26	5230^{b-e}
	50 K+ Zn	Tircace	3801^{m-q}		50 K+ Zn	Tircace	4236^{j-n}
		Q29	4321^{i-m}			Q29	4013^{k-p}
		Q26	4393^{h-m}			Q26	6406^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

عملکرد

عملکرد دانه: اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و همچنین برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی ($p \leq 0.05$)، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم، سال × محلول‌پاشی و سال × رقم و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم و همچنین سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی، سال × تنش خشکی × رقم و اثر سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج سال‌های مختلف نشان داد در سال دوم نسبت به سال اول به میزان ۱۷ درصد عملکرد دانه بیشتری تولید شد (جدول ۴). نتایج نشان داد در شرایط عدم تنش استفاده از محلول‌پاشی ترکیبی در ارقام مختلف باعث افزایش عملکرد دانه شد ولی با افزایش شدت تنش، هرچند محلول‌پاشی اثرات منفی تنش را کاهش داد ولی بر میزان عملکرد دانه کاسته شد. مقایسه میانگین صفات نشان داد بیشترین عملکرد دانه در شرایط ظرفیت زراعی ۱۰۰

درصد و محلول‌پاشی ترکیبی و در رقم Q26 به‌دست آمد که نسبت به تیمار ظرفیت زراعی ۲۵ درصد و شاهد بدون کود در رقم Tircace به میزان ۲۴۵ درصد افزایش عملکرد داشت (جدول ۱۰).

جدول ۹- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر وزن هزاردانه گیاه کینوا

Table 9- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa weight of 1000 seeds

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	وزن هزاردانه Weight of 1000 seeds (g)
FC 25	Control	Tircace	1.89^{qr}
		Q29	2.53^{g-j}
		Q26	2.76^{ef}
	100 K	Tircace	1.49^{u}
		Q29	2.42^{j-l}
		Q26	2.93^{bc}
	100 Zn	Tircace	1.49^{u}
		Q29	2.42^{j-l}
		Q26	2.89^{b-d}
	50 K+ Zn	Tircace	2.02^{pq}
		Q29	2.08^{op}
		Q26	1.86^{rs}
FC 50	Control	Tircace	1.66^{t}
		Q29	2.59^{gh}
		Q26	1.89^{qr}
	100 K	Tircace	2.41^{j-l}
		Q29	2.77^{d-f}
		Q26	2.04^{op}
	100 Zn	Tircace	2.43^{j-l}
		Q29	2.79^{de}
		Q26	2.07^{op}
	50 K+ Zn	Tircace	2.31^{lm}
		Q29	1.90^{qr}
		Q26	2.79^{de}
FC 75	Control	Tircace	2.53^{h-j}
		Q29	2.01^{pq}
		Q26	2.45^{i-k}
	100 K	Tircace	2.57^{g-i}
		Q29	2.21^{mn}
		Q26	1.76^{st}
	100 Zn	Tircace	2.59^{gh}
		Q29	2.17^{no}
		Q26	1.96^{p-r}
	50 K+ Zn	Tircace	3.28^{a}
		Q29	2.09^{op}
		Q26	3.37^{a}
FC 100	Control	Tircace	1.90^{qr}
		Q29	2.01^{pq}
		Q26	3.33^{a}
	100 K	Tircace	2.63^{gh}
		Q29	2.06^{op}
		Q26	2.85^{b-e}
	100 Zn	Tircace	2.66^{fg}
		Q29	2.02^{pq}
		Q26	2.81^{c-e}
	50 K+ Zn	Tircace	2.40^{kl}
		Q29	2.03^{p}
		Q26	2.96^{b}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p \leq 0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

عملکرد بیولوژیک: نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی، تنش خشکی × محلول‌پاشی، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سال × محلول‌پاشی و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم، سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی و سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود. نتایج نشان داد سال دوم آزمایش نسبت به سال اول به میزان ۲۶ درصد عملکرد بیولوژیک بیشتری تولید کرد (جدول ۴). نتایج نشان داد هرچند با افزایش شدت تنش بر عملکرد بیولوژیک کاسته شد ولی با اعمال محلول‌پاشی اثرات منفی تنش را کاهش دادند. بیشترین میزان این شاخص در تیمار ۱۰۰ درصد و 50 K+ Zn و رقم Tircace به‌دست آمد و کمترین میزان این شاخص در ظرفیت زراعی ۲۵ درصد و شاهد بدون کود در رقم Q29 گزارش شد (جدول ۱۱).

شاخص برداشت: اثرات اصلی سال، تنش خشکی و محلول‌پاشی و همچنین برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی و سال × محلول‌پاشی ($p \leq 0.05$)، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سال × رقم و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم و همچنین سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی، سال × تنش خشکی × رقم و اثر سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد در سال اول نسبت به سال دوم آزمایش به میزان ۹ درصد شاخص برداشت بیشتری را دارا بود (جدول ۴). مقایسه میانگین صفات نشان داد استفاده از محلول‌پاشی در شرایط عدم تنش به‌طور چشمگیری باعث بهبود شاخص برداشت شد. با افزایش شدت تنش بر شاخص برداشت کاسته شد. بیشترین میزان این شاخص در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و 100 Zn و رقم Q26 به‌دست آمد و کمترین میزان این شاخص در ظرفیت زراعی ۲۵ درصد و شاهد بدون کود در رقم Q29

گزارش شد (جدول ۱۲).

طبق نتایج محققان کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی متاثر از کاهش اجزای عملکرد از قبیل وزن هزاردانه و تعداد خوشه است. خشکی در طی مرحله پر شدن دانه معمولا وزن هزاردانه را کاهش می‌دهد که این امر احتمالا به دلیل کاهش مواد پرورده برای رشد دانه‌ها است. کاهش تولید مواد پرورده نیز به کاهش فرآیند فتوسنتز مربوط می‌شود که با بسته شدن روزنه‌ها مرتبط است و باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود (Keshtkar *et al.*, 2021). کاربرد پتاس و روی سبب بهبود عملکرد دانه تحت شرایط تنش و عدم وجود تنش، نسبت به عدم کاربرد آن‌ها شد که این افزایش به دلیل افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه است. به نظر می‌رسد اگرچه تنش خشکی سبب کاهش عملکرد گیاه شده اما محلول‌پاشی سبب می‌گردد تا تأثیرات منفی تنش خشکی بر رشد گیاه کاهش یافته و رشد و عملکرد گیاه و تولید متابولیت‌های ثانویه به میزان قابل توجهی افزایش یابد. کودهای پتاسه و ریز مغذی روی در تمام جنبه‌های چرخه حیاتی گیاه کاربرد دارد و می‌توانند بر واکنش‌های گیاه اثر عمیقی داشته باشند (Creelman & Mullet, 2008). از طرف دیگر، عموماً کمبود آب سبب کاهش تولید مواد پرورده و در نتیجه باعث کاهش اندام‌های رویشی و اندام‌های زایشی می‌شود که نهایتاً می‌تواند منجر به کاهش عملکرد زیستی گیاه در شرایط محدودیت آب گردد (Wang, Jiang, Chen, Tian, & Lv, 2021). چنگ و همکاران (۲۰۲۱) کم‌آبیاری را در مراحل مختلف رشد ذرت اعمال و گزارش کردند که کمبود شدید آب در مراحل اولیه رشد منجر به کاهش ماده خشک گیاه می‌گردد (Cheng, Wang, Fan, Zhang, & Wang, 2021). کمبود رطوبت از طریق کاهش تولید و افزایش پیری برگ‌ها، شاخص سطح برگ را کاهش می‌دهد. در پژوهشی دیگر با اعمال تنش خشکی در مرحله رشد رویشی خلر کاهش معنی‌داری در عملکرد بیولوژیک گیاه مشاهده شد و بالاترین عملکرد بیولوژیکی در شرایط بدون تنش حاصل شد (Talukdar, 2013). به نظر می‌رسد افزایش عملکرد بیولوژیک در تیمار آبیاری مطلوب، به دلیل گسترش بیشتر و طول دوره سبزمانی زیادتر برگ‌ها بوده، که منجر به ایجاد مبدأ فیزیولوژیک بزرگ‌تری می‌گردد. همچنین، پژوهشگران معتقدند که از مرحله گلدهی تا رسیدن دانه، ظرفیت فتوسنتزی به ویژگی‌های برگ پرچم شامل سرعت فتوسنتز، کارایی آنزیم رابیسکو، غلظت کلروفیل و مساحت آن بستگی دارد احتمالاً کاربرد کود پتاسه و روی در طی تنش خشکی سبب افزایش ظرفیت فتوسنتزی و درنهایت افزایش عملکرد بیولوژیک می‌شود (Swiatek, Azmi, Witters, & Van Onckelen, 2003). افزایش عملکرد بیولوژیک توسط محلول‌پاشی پتاسه در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است (Sofy, Sharaf, & Fouda, 2016). از آن‌جایی‌که یکی از اجزای محاسبه شاخص برداشت عملکرد دانه است، تغییرات شاخص برداشت وابستگی زیادی به تغییرات عملکرد دانه دارد. لیکن، بر اساس معادله شاخص برداشت چون تنش خشکی اثر کاهشی بارزی بر عملکرد بیولوژیک داشته، در حالی‌که تأثیر آن بر عملکرد دانه به‌طور نسبی کمتر بوده است، لذا شاخص برداشت در این شرایط کاهش کمتری نشان داده است (Farokhian *et al.*, 2021). از دلایل کاهش عملکرد دانه در اثر تنش کم‌آبی کوتاه شدن دوره رشد و تسریع پیری برگ‌هاست. البته کاهش سطح فتوسنترکننده، تولید اسیمیلات فتوسنتزی و نهایتاً رشد کمتر گیاه در شرایط تنش‌زا، می‌تواند به کاهش عملکرد اقتصادی و متعاقب آن در کاهش شاخص برداشت مؤثر باشد (Fahad *et al.*, 2017).

میزان بارندگی بیشتر و کاهش تبخیر و تعرق در سال دوم کمک فرایندهای در افزایش میزان عملکرد بیولوژیک و دانه و در نتیجه شاخص برداشت داشت. پژوهش‌های مختلف نیز مؤید این مطلب است که در سال‌های پر باران عملکرد و اجزای عملکرد گیاهان افزایش یافته است (Waraich, Ahmad, Ashraf, Saifullah, & Ahmad, 2011). کاهش عملکرد مهم‌ترین چالش در کشاورزی در شرایط کمبود بارندگی است. در گیاهان، خشکی می‌تواند باعث کاهش سرعت فتوسنتزی، محتوای کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، میزان تعرق و محتوای نسبی آب برگ و تخریب برخی فرآیندهای فیزیولوژیکی شود که در نهایت باعث کاهش رشد و نمو گیاه می‌شود (Waraich *et al.*, 2011).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

کلروفیل a: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی تنش خشکی، محلول‌پاشی ($p \leq 0.01$)، رقم ($p \leq 0.05$) و برهمکنش دوگانه تنش خشکی × محلول‌پاشی، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) و سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم، سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی، سال × تنش خشکی × رقم و سال × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی کلروفیل a معنی‌دار بودند (جدول ۱۳). نتایج نشان داد در تمام ارقام، هرچند محلول‌پاشی باعث باعث افزایش کلروفیل a شد ولی با افزایش شدت تنش بر میزان این شاخص کاسته شد. بیشترین میزان این شاخص در شرایط بدون تنش و رقم Q26 و در حضور محلول‌پاشی Zn 100 به‌دست آمد که نسبت به کمترین میزان این شاخص که در تیمار تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و رقم Tircace و محلول‌پاشی k 100 به میزان ۲۲۳ درصد دارای کلروفیل a بیشتری بود (جدول ۱۴).

جدول ۱۰- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر عملکرد دانه گیاه کینوا

Table 10- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Seed yield

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha^{-1})	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha^{-1})
FC 25	Control	Tircace	660^{q}	FC 75	Control	Tircace	1224^{k-n}
		Q29	700^{q}			Q29	997^{op}
		Q26	1075^{no}			Q26	1393^{h-k}
	100 K	Tircace	1256^{j-m}		100 K	Tircace	1815^{b-d}
		Q29	1083^{m-o}			Q29	1878^{bc}
		Q26	1529^{f-h}			Q26	1489^{f-h}
	100 Zn	Tircace	871^{p}		100 Zn	Tircace	1660^{d-f}
		Q29	1143^{l-o}			Q29	1624^{e-g}
		Q26	1232^{k-n}			Q26	1309^{i-l}
	50 K+ Zn	Tircace	1050^{o}		50 K+ Zn	Tircace	1743^{c-e}
		Q29	1103^{m-o}			Q29	1736^{c-e}
		Q26	1547^{f-h}			Q26	1870^{bc}
FC 50	Control	Tircace	1126^{m-o}	FC 100	Control	Tircace	1250^{j-m}
		Q29	1007^{op}			Q29	1297^{j-l}
		Q26	1084^{m-o}			Q26	1483^{gh}
	100 K	Tircace	1627^{e-g}		100 K	Tircace	1868^{bc}
		Q29	1626^{e-g}			Q29	1802^{b-d}
		Q26	1389^{h-k}			Q26	2233^{a}
	100 Zn	Tircace	1470^{g-i}		100 Zn	Tircace	1532^{f-h}
		Q29	1411^{h-j}			Q29	1858^{bc}
		Q26	1110^{m-o}			Q26	2176^{a}
	50 K+ Zn	Tircace	1540^{f-h}		50 K+ Zn	Tircace	1836^{bc}
		Q29	1298^{j-l}			Q29	1950^{b}
		Q26	1373^{h-k}			Q26	2268^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p \leq 0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۱۱- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر عملکرد بیولوژیک گیاه کینوا

Table 11- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Biological yield

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})
FC 25	Control	Tircace	2200^{uv}	FC 75	Control	Tircace	2496^{s-u}
		Q29	1918^{v}			Q29	2635^{q-t}
		Q26	1972^{v}			Q26	2989^{m-r}
	100 K	Tircace	2982^{m-r}		100 K	Tircace	3273^{j-o}
		Q29	2903^{n-s}			Q29	5752^{a}
		Q26	2700^{q-t}			Q26	3872^{d-g}
	100 Zn	Tircace	2560^{r-u}		100 Zn	Tircace	2823^{o-s}
		Q29	1949^{v}			Q29	4690^{b}
		Q26	3009^{m-r}			Q26	2582^{r-u}
	50 K+ Zn	Tircace	3559^{f-k}		50 K+ Zn	Tircace	3449^{g-l}
		Q29	2883^{o-s}			Q29	3095^{l-q}
		Q26	3749^{d-i}			Q26	4125^{cd}
FC 50	Control	Tircace	2776^{p-s}	FC 100	Control	Tircace	2786^{p-s}
		Q29	2729^{q-t}			Q29	2940^{n-s}
		Q26	2300^{t-v}			Q26	4798^{b}
	100 K	Tircace	3415^{h-m}		100 K	Tircace	3668^{e-j}
		Q29	4071^{c-e}			Q29	3938^{d-f}
		Q26	3635^{e-k}			Q26	4456^{bc}
	100 Zn	Tircace	3347^{i-n}		100 Zn	Tircace	4124^{cd}
		Q29	2970^{m-r}			Q29	3590^{f-k}
		Q26	3207^{k-p}			Q26	3479^{g-l}
	50 K+ Zn	Tircace	4004^{d-f}		50 K+ Zn	Tircace	5391^{a}
		Q29	3847^{d-h}			Q29	4012^{d-f}
		Q26	3780^{d-i}			Q26	4625^{b}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p \leq 0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۱۲- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر شاخص برداشت گیاه کینوا

Table 12-Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa harvest index

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	شاخص برداشت Harvest index (%)	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	شاخص برداشت Harvest index (%)
FC 25	Control	Tircace	30.2st	FC 75	Control	Tircace	49.6^{c-k}
		Q29	26.4^{t}			Q29	38.4^{m-s}
		Q26	47.6^{e-m}			Q26	46.8^{f-n}
	100 K	Tircace	42.1^{i-p}		100 K	Tircace	56.7^{a-d}
		Q29	38.5^{m-s}			Q29	40.2^{l-q}
		Q26	58.5^{a-c}			Q26	41.5^{j-p}
	100 Zn	Tircace	35.5^{o-s}		100 Zn	Tircace	59.9^{ab}
		Q29	59.9^{ab}			Q29	38.6^{m-s}
		Q26	43.2^{h-o}			Q26	51.3^{b-i}
	50 K+ Zn	Tircace	30.4^{r-t}		50 K+ Zn	Tircace	52.0^{b-h}
		Q29	39.5^{m-r}			Q29	59.3^{ab}
		Q26	39.6^{m-q}			Q26	46.0^{f-n}
FC 50	Control	Tircace	40.9^{k-p}	FC 100	Control	Tircace	45.7^{f-n}
		Q29	52.0^{b-h}			Q29	44.1^{f-o}
		Q26	56.2^{a-e}			Q26	31.2^{q-t}
	100 K	Tircace	50.3^{c-j}		100 K	Tircace	52.7^{b-g}
		Q29	42.2^{i-p}			Q29	46.0^{f-n}
		Q26	38.6^{m-s}			Q26	53.3^{b-f}
	100 Zn	Tircace	44.9^{f-n}		100 Zn	Tircace	38.0^{n-s}
		Q29	51.8^{b-h}			Q29	51.9^{b-h}
		Q26	35.0^{o-s}			Q26	63.3^{a}
	50 K+ Zn	Tircace	39.4^{m-r}		50 K+ Zn	Tircace	43.9^{g-o}
		Q29	33.7^{p-t}			Q29	49.0^{d-l}
		Q26	35.7^{o-s}			Q26	49.1^{d-l}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p \leq 0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

کلروفیل b: تجزیه واریانس صفات نشان داد اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و همچنین برهمکنش دوگانه تنش خشکی × محلول‌پاشی، تنش خشکی × رقم و محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم و همچنین سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی ($p \leq 0.01$) بر روی کلروفیل b معنی‌دار بود (جدول ۱۳). نتایج نشان داد در سال دوم آزمایش نسبت به سال اول به میزان ۱۹ درصد کلروفیل b بیشتری به‌دست آمد (جدول ۱۵). ارقام مختلف نسبت به تنش خشکی و محلول‌پاشی واکنش متفاوتی داشتند. هرچند محلول‌پاشی اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داد ولی با افزایش شدت تنش بر میزان شاخص کلروفیل b کاسته شد. بیشترین میزان کلروفیل b در شرایط عدم تنش و محلول‌پاشی ترکیبی در رقم Q26 به‌دست آمد و کمترین میزان این شاخص در تیمار تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی 100 k در رقم Tircace حاصل شد (جدول ۱۶).

کاروتنوئید: اثرات اصلی تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و برهمکنش دوگانه تنش خشکی × محلول‌پاشی، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم، سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی، سال × تنش خشکی × رقم و سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی کاروتنوئید معنی‌دار بودند (جدول ۱۳). نتایج نشان داد در تمام ارقام، هرچند محلول‌پاشی باعث باعث افزایش کاروتنوئید شد ولی با افزایش شدت تنش بر میزان این شاخص کاسته شد. بیشترین میزان این شاخص در شرایط بدون تنش و رقم Tircace و در حضور محلول‌پاشی 100 k به‌دست آمد که نسبت به کمترین میزان این شاخص که در تیمار تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و رقم Tircace و شاهد بدون کود به میزان دو برابر دارای کاروتنوئید بیشتری بود (جدول ۱۷).

نسبت کلروفیل a/b: نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد اثرات اصلی سال، تنش خشکی، محلول‌پاشی و برهمکنش دوگانه سال × تنش خشکی، تنش خشکی × محلول‌پاشی، تنش خشکی × رقم، محلول‌پاشی × رقم و سال × محلول‌پاشی و برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم، سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی، سال × تنش خشکی × رقم و سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی نسبت کلروفیل a/b معنی‌دار بود (جدول ۱۳). نتایج نشان داد سال اول آزمایش نسبت به سال دوم به میزان ۲۶

درصد نسبت کلروفیل a/b بیشتری تولید کرد (جدول ۱۵). نتایج نشان داد بیشترین میزان این شاخص در تیمار ۵۰ درصد و 50 K+ Zn و رقم Tircace به‌دست آمد و کمترین میزان این شاخص در ظرفیت زراعی ۲۵ درصد و محلول‌پاشی ترکیبی در رقم Q26 گزارش شد (جدول ۱۸).

مجموع کلروفیل: با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثرات اصلی تنش خشکی، محلول‌پاشی و رقم و برهمکنش دوگانه تنش خشکی × محلول‌پاشی و تنش خشکی × رقم و سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم، سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی، سال × تنش خشکی × رقم و سال × محلول‌پاشی × رقم و برهمکنش چهارگانه سال × تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم ($p \leq 0.01$) بر روی مجموع کلروفیل معنی‌دار بودند (جدول ۱۳). نتایج نشان داد در تمام ارقام، هرچند محلول‌پاشی باعث باعث افزایش کلروفیل a شد ولی با افزایش شدت تنش بر میزان این شاخص کاسته شد. بیشترین میزان این شاخص در شرایط ۷۵ درصد ظرفیت زراعی و رقم Q29 و در حضور محلول‌پاشی k 100 به‌دست آمد که نسبت به کمترین میزان این شاخص که در تیمار تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و رقم Tircace و محلول‌پاشی k 100 به میزان ۱۱۲ درصد دارای مجموع کلروفیل بیشتری بود (جدول ۱۹).

یکی از اثرات تنش خشکی بر عملکرد گیاه، کاهش فتوسنتز است. ساده‌ترین برآورد کاهش فتوسنتز، اندازه‌گیری کمی مقادیر کلروفیل و کاروتنوئیدها است. کلروفیل‌ها در غشای تیلاکوئید گیاهان عالی با پلی‌پپتیدهای خاص ترکیب می‌شوند تا مجتمع رنگدانه–پروتئین را تشکیل دهند (Aliyeva *et al.*, 2019). تغییرات در مجموعه رنگدانه–پروتئین منجر به تغییر در مقدار کلروفیل در غشای تیلاکوئید می‌شود (Karlický, Kmecová Materová, & Kurasová, 2021). کمپلکس رنگدانه–پروتئین با شرایط محیطی تغییر می‌کند، در نتیجه مقدار کلروفیل نیز در پاسخ به تغییرات محیطی تغییر می‌کند. تنش خشکی یکی از شرایط محیطی موثر بر تغییرات محتوای کلروفیل است که می‌تواند محتوای کلروفیل را به دلیل اختلال در مسیرهای بیوسنتز کلروفیل و تنش اکسیداتیو ناشی از انواع مختلف گونه‌های فعال اکسیژن کاهش دهد (Yang *et al.*, 2021). علاوه بر این، تنش خشکی که بر وضعیت آب بافت‌ها تأثیر می‌گذارد، تأثیر منفی بر فرآیندهای توسعه کلروپلاست دارد و سرعت تجمع کلروفیل در کلروپلاست‌ها را کاهش می‌دهد (Hameed *et al.*, 2021).

جدول ۱۳-تجزیه واریانس رنگیزه‌های فتوسنتزی کینوا تحت تاثیر تیمارهای مختلف

Table 13-Variance analysis of quinoa photosynthetic pigments under the influence of different treatments

منابع تغییر Source of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات: کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئید Carotenoids	نسبت a/b a/b ratio	مجموع کلروفیل Total chlorophyll
سال (Year) (Y)	1	0.169^{ns}	0.089**	0.304**	235**	0.189^{ns}
خطای سال (Rep year)	4	1.458	0.009	0.112	19.7	2.09
تنش خشکی (Irrigation regime) (S)	3	2.282**	0.012**	0.035**	35.4**	3.23**
Y * S	3	0.034^{ns}	0.000001^{ns}	0.0001^{ns}	3.84**	0.034^{ns}
خطای S Rep (Y)	12	0.003	0.0001	0.0002	0.528	0.003
محلول‌پاشی (Foliar spray) (F)	3	1.127**	0.013**	0.092**	21**	2.18**
رقم (Cultivar) (C)	2	0.198*	0.006**	0.254**	1.1^{ns}	0.592**
S * F	9	0.761**	0.025**	0.055**	50.6**	0.939**
S * C	6	0.573**	0.040**	0.017**	44**	0.672**
F *C	6	0.334**	0.023**	0.118**	19.3**	0.113^{ns}
S * F * C	18	0.474**	0.028**	0.044**	28.4**	0.535**
Y * F	3	0.052^{ns}	0.002^{ns}	0.006^{ns}	9.75**	0.099^{ns}
Y * C	2	0.0002^{ns}	0.000001^{ns}	0.0000004^{ns}	0.055^{ns}	0.0003^{ns}
Y * S * F	9	0.903**	0.000001^{ns}	0.031**	40.5**	0.882**
Y * S * C	6	0.184**	0.000001^{ns}	0.001**	4.41**	0.184**
Y * F * C	6	0.159**	0.000001^{ns}	0.038**	7.80**	0.351**
Y * S * F * C	18	0.364**	0.000001^{ns}	0.030**	8.58**	0.397**
خطای کل (Total error)	176	0.048	0.001	0.002	0.851	0.063
ضریب تغییرات (Coefficient of variation)		14.6	13.4	9.0	11.7	11.1

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p \leq 0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۱۴- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر کلروفیل a گیاه کینوا

Table 14- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Chlorophyll a

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.gfw^{-1})	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	کلروفیلa Chlorophyll a (mg.gfw^{-1})
FC 25	Control	Tircace	1.54^{d-f}	FC 75	Control	Tircace	1.38^{e-i}
		Q29	1.61^{c-e}			Q29	1.37^{e-i}
		Q26	1.15^{h-j}			Q26	1.38^{e-h}
	100 K	Tircace	0.676^{k}		100 K	Tircace	1.51^{b-g}
		Q29	0.877^{jk}			Q29	2.03^{ab}
		Q26	2.09^{a}			Q26	1.72^{cd}
	100 Zn	Tircace	1.15^{h-j}		100 Zn	Tircace	1.67^{c-e}
		Q29	1.11^{h-j}			Q29	1.74^{b-d}
		Q26	1.49^{d-g}			Q26	1.24^{f-i}
	50 K+ Zn	Tircace	1.15^{h-j}		50 K+ Zn	Tircace	1.78^{b-d}
		Q29	1.11^{h-j}			Q29	1.88^{a-c}
		Q26	1.49^{d-g}			Q26	2.16^{a}
FC 50	Control	Tircace	1.23^{g-i}	FC 100	Control	Tircace	1.38^{e-i}
		Q29	1.07^{h-j}			Q29	1.37^{e-i}
		Q26	1.15^{h-j}			Q26	1.38^{e-h}
	100 K	Tircace	1.37^{e-i}		100 K	Tircace	1.51^{d-g}
		Q29	1.58^{c-e}			Q29	2.03^{ab}
		Q26	1.07^{ij}			Q26	1.72^{cd}
	100 Zn	Tircace	1.77^{b-d}		100 Zn	Tircace	1.78^{b-d}
		Q29	1.59^{c-e}			Q29	1.88^{a-c}
		Q26	1.58^{c-e}			Q26	2.16^{a}
	50 K+ Zn	Tircace	1.77^{b-d}		50 K+ Zn	Tircace	1.67^{c-e}
		Q29	1.59^{c-e}			Q29	1.74^{b-d}
		Q26	1.58^{c-e}			Q26	1.24^{f-i}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۱۵- مقایسه میانگین اثر اصلی سال بر صفات مختلف

Table 15- Comparison of the average main effect of the year on different traits

سال Year	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gfw^{-1})	کارتنوئید Carotenoids (mg.gfw^{-1})	نسبت کلروفیل a/b Chlorophyll a/b ratio
2018-19	0.189^{b}	0.515^{b}	8.79^{a}
2019-20	0.224^{a}	0.580^{a}	6.98^{b}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

در نتایج این آزمایش کاهش محتوای کلروفیل در اثر تنش خشکی مشاهده شد. مشابه نتایج تحقیق حاضر، در آزمایش حق‌شناس و همکاران (Haghshenas, Nazarideljou, & Shokoohian, 2020)، گزارش شد که پس از اعمال تنش، میزان کلروفیل کل و کلروفیل a در توت‌فرنگی کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که کاربرد محلول‌پاشی پتاس و روی موجب افزایش شاخص کلروفیل برگ در هر دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی شدند که با توجه به نقش این عناصر در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی، کاهش احتمالی فعالیت آنزیم کلروفیلاز و تشکیل کلروفیل (Waraich, Ahmad, Halim, & Aziz, 2012) می‌تواند قابل‌توجیه باشد. از آن‌جایی‌که میزان کلروفیل با فراهمی کودها در ارتباط است (Mohseni, Esmaeili, Pirdashti, Abbasi, & Nasiri, 2020)، به‌نظر می‌رسد که در تیمارهای مصرف کود پتاسیم، مواد لازم جهت ساخت کلروفیل بیشتر در اختیار گیاه بوده و میزان کلروفیل در آن‌ها بیشتر از تیمارهای عدم مصرف این کودها است (Moemeni, Ghobadi, Jalali-Honarmand, & Shekaari, 2015). همچنین

گزارش گردید که پتاسیم با بهبود هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش و ممانعت از تجزیه کلروفیل توسط تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌تواند نقش مؤثری در افزایش محتوی کلروفیل در شرایط تنش داشته باشد (Alavi Matin, Rahnama, & Meskarbashi, 2015).

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش به‌وضوح نشان داد که کاربرد ترکیبی محلول‌پاشی پتاس و روی و اعمال تنش خشکی در شرایط آب و هوایی دو سال آزمایش تمامی صفات مورد بررسی در این آزمایش را تحت تأثیر قرار داد. به‌طوری‌که ترکیب تیمارهای محلول‌پاشی ترکیبی (50 K+ Zn) در ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بیشترین میزان ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ و وزن خشک گیاه تولید نمود. در همین تیمار نیز بیشترین عملکرد بذر و عملکرد بیولوژیک مشاهده گردید. در این آزمایش هرچند با کاهش میزان آب مصرفی و به تبع آن بروز تنش خشکی از عملکرد گیاه کینوا کاسته می‌شود اما با مصرف محلول‌پاشی، به‌ویژه محلول‌پاشی ترکیبی می‌توان تا حد مطلوبی از بروز اثرات سوء تنش خشکی بر عملکرد این گیاه کاست. به نظر می‌رسد در منطقه مورد نظر تفاوت میزان بارندگی و تبخیر و تعرق در دو سال آزمایش تأثیر قابل‌توجهی بر صفات مورد بررسی گذاشت به‌طوری‌که در سال اول کاهش محدودیت منابع آبی در کاهش رشد گیاه و عملکرد آن نسبت به سال دوم مؤثر بود با این‌حال استفاده از مقادیر مناسب محلول‌پاشی ترکیبی و جداگانه به منظور افزایش توانایی گیاه در جذب مؤثرتر آب، روش مناسبی برای افزایش عملکرد ارقام مختلف کینوا می‌باشد.

جدول ۱۶- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر کلروفیل b گیاه کینوا

Table 16- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Chlorophyll b

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gfw^{-1})	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gfw^{-1})
FC 25	Control	Tircace	0.201^{f-i}	FC 75	Control	Tircace	0.191^{g-j}
		Q29	0.148^{k-n}			Q29	0.222^{fg}
		Q26	0.213^{f-h}			Q26	0.159^{j-m}
	100 K	Tircace	0.118^{n}		100 K	Tircace	0.184^{h-k}
		Q29	0.198^{f-i}			Q29	0.309^{cd}
		Q26	0.230^{f}			Q26	0.179^{h-k}
	100 Zn	Tircace	0.179^{h-k}		100 Zn	Tircace	0.320^{c}
		Q29	0.179^{h-k}			Q29	0.211^{f-h}
		Q26	0.220^{fg}			Q26	0.131^{mn}
	50 K+ Zn	Tircace	0.213^{f-h}		50 K+ Zn	Tircace	0.175^{h-k}
		Q29	0.211^{f-h}			Q29	0.368^{b}
		Q26	0.190^{g-j}			Q26	0.179^{h-k}
FC 50	Control	Tircace	0.276^{de}	FC 100	Control	Tircace	0.170^{i-l}
		Q29	0.200^{f-i}			Q29	0.130^{mn}
		Q26	0.209^{f-h}			Q26	0.140^{l-n}
	100 K	Tircace	0.187^{g-j}		100 K	Tircace	0.228^{f}
		Q29	0.182^{h-k}			Q29	0.271^{e}
		Q26	0.151^{k-n}			Q26	0.209^{f-h}
	100 Zn	Tircace	0.168^{i-l}		100 Zn	Tircace	0.235^{f}
		Q29	0.171^{i-l}			Q29	0.209^{f-h}
		Q26	0.391^{b}			Q26	0.218^{fg}
	50 K+ Zn	Tircace	0.145^{l-n}		50 K+ Zn	Tircace	0.173^{i-l}
		Q29	0.148^{k-n}			Q29	0.170^{i-l}
		Q26	0.163^{i-m}			Q26	0.431^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۱۷- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر کارتنوئید گیاه کینوا

Table 17- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Carotenoids

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	کارتنوئید Carotenoids (mg.gfw^{-1})	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	کارتنوئید Carotenoids (mg.gfw^{-1})
FC 25	Control	Tircace	0.228^{p}	FC 75	Control	Tircace	0.454^{l-n}
		Q29	0.525^{h-k}			Q29	0.666^{a-c}
		Q26	0.430^{mn}			Q26	0.632^{a-f}
	100 K	Tircace	0.596^{d-g}		100 K	Tircace	0.657^{a-d}
		Q29	0.490^{k-m}			Q29	0.603^{c-g}
		Q26	0.312^{o}			Q26	0.528^{h-k}
	100 Zn	Tircace	0.486^{k-m}		100 Zn	Tircace	0.584^{e-h}
		Q29	0.648^{a-e}			Q29	0.653^{a-d}
		Q26	0.588^{d-h}			Q26	0.502^{i-l}
	50 K+ Zn	Tircace	0.572^{f-i}		50 K+ Zn	Tircace	0.585^{e-h}
		Q29	0.681^{ab}			Q29	0.654^{a-d}
		Q26	0.559^{g-j}			Q26	0.502^{i-l}
FC 50	Control	Tircace	0.455^{l-n}	FC 100	Control	Tircace	0.494^{j-m}
		Q29	0.526^{h-k}			Q29	0.516^{i-l}
		Q26	0.428^{mn}			Q26	0.635^{a-f}
	100 K	Tircace	0.592^{d-g}		100 K	Tircace	0.683^{a}
		Q29	0.489^{k-m}			Q29	0.617^{b-g}
		Q26	0.312^{o}			Q26	0.638^{a-f}
	100 Zn	Tircace	0.572^{f-i}		100 Zn	Tircace	0.567^{g-i}
		Q29	0.681^{ab}			Q29	0.634^{a-f}
		Q26	0.561^{g-j}			Q26	0.416^{n}
	50 K+ Zn	Tircace	0.485^{k-m}		50 K+ Zn	Tircace	0.567^{g-i}
		Q29	0.648^{a-e}			Q29	0.636^{a-f}
		Q26	0.589^{d-h}			Q26	0.416^{n}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۱۸- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر نسبت کلروفیل a/b گیاه کینوا

Table 18- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Chlorophyll a/b ratio

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	نسبت کلروفیل a/b Chlorophyll a/b ratio	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	نسبت کلروفیل a/b Chlorophyll a/b ratio
FC 25	Control	Tircace	7.64^{l-p}	FC 75	Control	Tircace	7.23^{n-r}
		Q29	11.1^{cd}			Q29	6.23^{q-t}
		Q26	5.32^{s-u}			Q26	8.69^{h-l}
	100 K	Tircace	6.03^{r-t}		100 K	Tircace	8.11^{k-o}
		Q29	4.56^{uv}			Q29	6.71^{p-r}
		Q26	9.15^{f-k}			Q26	9.70^{e-i}
	100 Zn	Tircace	6.51^{p-s}		100 Zn	Tircace	5.23^{tu}
		Q29	6.62^{p-r}			Q29	8.52^{i-m}
		Q26	7.06^{o-r}			Q26	9.36^{f-j}
	50 K+ Zn	Tircace	5.42^{s-u}		50 K+ Zn	Tircace	10.2^{d-f}
		Q29	5.35^{s-u}			Q29	5.12^{t-v}
		Q26	7.59^{l-p}			Q26	12.4^{ab}
FC 50	Control	Tircace	4.43^{uv}	FC 100	Control	Tircace	8.14^{k-o}
		Q29	5.40^{s-u}			Q29	10.82^{c-e}
		Q26	5.43^{s-u}			Q26	9.98^{d-g}
	100 K	Tircace	7.42^{m-q}		100 K	Tircace	6.83^{p-r}
		Q29	8.93^{g-k}			Q29	7.53^{l-p}
		Q26	7.06^{o-r}			Q26	8.32^{j-n}
	100 Zn	Tircace	10.3^{c-f}		100 Zn	Tircace	7.70^{l-p}
		Q29	9.38^{f-j}			Q29	9.20^{f-k}
		Q26	3.98^{v}			Q26	9.88^{e-h}
	50 K+ Zn	Tircace	13.2^{a}		50 K+ Zn	Tircace	9.84^{e-h}
		Q29	11.4^{bc}			Q29	10.32^{c-f}
		Q26	10.3^{c-f}			Q26	2.87^{w}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

جدول ۱۹- برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × محلول‌پاشی × رقم بر مجموع کلروفیل گیاه کینوا

Table 19- Triple interaction of drought stress × foliar spray × cultivar on quinoa Total chlorophyll

خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	مجموع کلروفیل Total chlorophyll ($mg.gfw^{-1}$)	خشکی Irrigation regime	کود Fertilizer	رقم Cultivar	مجموع کلروفیل Total chlorophyll ($mg.gfw^{-1}$)
FC 25	Control	Tircace	2.19^{h-p}	FC 75	Control	Tircace	1.80^{q-s}
		Q29	2.28^{g-n}			Q29	2.25^{g-o}
		Q26	1.79^{q-s}			Q26	2.17^{i-p}
	100 K	Tircace	1.39^{t}		100 K	Tircace	2.35^{f-l}
		Q29	1.57^{r-t}			Q29	2.94^{a}
		Q26	2.64^{a-f}			Q26	2.42^{e-k}
	100 Zn	Tircace	1.81^{q-s}		100 Zn	Tircace	2.58^{c-g}
		Q29	1.94^{n-q}			Q29	2.60^{b-g}
		Q26	2.30^{f-m}			Q26	1.87^{p-r}
	50 K+ Zn	Tircace	1.93^{o-q}		50 K+ Zn	Tircace	2.55^{d-g}
		Q29	2.01^{l-q}			Q29	2.90^{a-c}
		Q26	2.25^{g-o}			Q26	2.85^{a-d}
FC 50	Control	Tircace	1.96^{m-q}	FC 100	Control	Tircace	2.04^{l-q}
		Q29	1.80^{q-s}			Q29	2.01^{l-q}
		Q26	1.78^{q-s}			Q26	2.16^{i-p}
	100 K	Tircace	2.15^{j-p}		100 K	Tircace	2.42^{e-k}
		Q29	2.26^{g-o}			Q29	2.92^{ab}
		Q26	1.54st			Q26	2.56^{d-g}
	100 Zn	Tircace	2.51^{d-i}		100 Zn	Tircace	2.59^{c-g}
		Q29	2.45^{e-j}			Q29	2.72^{a-e}
		Q26	2.53^{d-h}			Q26	2.80^{a-d}
	50 K+ Zn	Tircace	2.40^{e-k}		50 K+ Zn	Tircace	2.42^{e-k}
		Q29	2.39^{e-k}			Q29	2.54^{d-h}
		Q26	2.33^{f-l}			Q26	2.08^{k-q}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($p\leq0.05$)

Means with similar letters are not significantly different at 5% of probability

References

1. Abarshahr, M., Rabiei, B., & Samizadeh-Lahigi, H. (2011). Assessing genetic diversity of rice varieties under drought stress conditions. *Notulae Scientia Biologicae, 3*, 114-123.
2. Adebayo, M. A., Menkir, A., Blay, E., Gracen, V., Danquah, E., & Hearne, S. (2014). Genetic analysis of drought tolerance in adapted × exotic crosses of maize inbred lines under managed stress conditions. *Euphytica*, *196*, 261-270.
3. Adolf, V. I., Shabala, S., Andersen, M. N., Razzaghi, F., & Jacobsen, S. E. (2012). Varietal differences of quinoa's tolerance to saline conditions. *Plant and Soil*, *357*(1-2), 117-129.
4. Alavi Matin, S., Rahnama, A., & Meskarbashi, M. (2015). Effects of type and rate of potassium fertilizer on agronomic and physiological traits of two durum wheat varieties under salt stress. *Cereal Research*, *5*(2), 177-187. (in Persian with English abstract).
5. Aliyeva, N. Kh., Gafarova, E. E., Aliyeva, D. R., Suleymanov, S. Y., Rzayev, F. H., & Gasimov, E. K. (2019). The effect of salt (NaCl) stress on the ultrastructure of mesophyll and bundle sheath cell chloroplasts and the activity of superoxide dismutase in maize plants (*Zea mays* L.). *Journal of Life Sciences & Biomedicine*, *1*(74), 96-104.
6. Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, *23*, 112-121.
7. Azab, E. (2016). Effect of Water Stress and Biological Fertilization on Maize Growth, Chemical Composition and Productivity in Calcareous Soil. *American Journal of Plant Physiology*, *11*, 1-11.
8. Azizabadi, E., Golchin, A., & Delavar, M. (2014). Effect of potassium and drought stress on growth indices and mineral content of safflower leaf. *Journal of Statistical Planning and Inference*, *5*(3), 65-80. (in Persian with English abstract).
9. Babaei, Kh., Seyed Sharifi, R., Pirzad, P., & Khalilzadeh, R. (2017). Effects of bio fertilizer and nano Zn-Fe oxide on physiological traits, antioxidant enzymes activity and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Interactions*, *12*(1), 381-389. https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1371798

10. Babaeian, M., Heidari, M., & Ghanbari, A. (2008). Effects of foliar micronutrient application on osmotic adjustments, grain yield and yield components in sunflower (Alster cultivar) under water stress at three stages. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, *40*(12), 119-129.
11. Campelo, D. H., Teixeira, A. S., Moreira, L. C. J., & Lacerda, C. F. (2019). Growth, production and water and nitrogen use efficiency of maize under water depths and nitrogen fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *23*(10), 747-753. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10
12. Casamali, B., van Iersel, M. W., & Chavez, D. J. (2021). Plant Growth and Physiological Responses to Improved Irrigation and Fertilization Management for Young Peach Trees in the Southeastern United States, *HortScience horts*, *56*(3), 336-346. Retrieved Apr 19, 2022, from https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/56/3/article-p336.xml
13. Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, F., & Wang, X. (2021). Effects of Soil Water Deficit at Different Growth Stages on Maize Growth, Yield, and Water Use Efficiency under Alternate Partial Root-Zone Irrigation. *Water*, *13*, 148. https://doi.org/10.3390/w13020148
14. Creelman, R. A., & Mullet, J. E. (2008). Biosynthesis and action of Jasmonates in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, *48*, 355-381.
15. Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D., & Huang, J. (2017) Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. *Frontiers in Plant Science*, *1147*. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147
16. Farokhian, Sh., Tohidi-Nejad, E., & Mohammadi-Nejad, Gh. (2021). Studying the effect of bio-fertilizers on the yield components of Sesame (*Sesamum indicum*) genotypes under drought stress condition. *Central Asian Journal of Plant Science Innovation*, *1*(1), 32-38. https://doi.org/10.22034/CAJPSI.2021.01.04
17. Ghavamsaeidi noghabi, S., Shahidi, A., & Homami, H. (2021). Estimation of Water Requirement and Crop Coefficient for Hemp at Different Growth Stages in Birjand Plain. *Journal of Water Research in Agriculture*, *34*(4), 563-573. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/jwra.2021.122794.
18. Giunta, F., Mefleh, M., Pruneddu, G., & Motzo, R. (2021). Role of Nitrogen Uptake and Grain Number on the Determination of Grain Nitrogen Content in Old Durum Wheat Cultivars. *Agronomy*, *11*, 42. https://doi.org/10.3390/agronomy11010042
19. Haghshenas, M., Nazarideljou, M. J., & Shokoohian, A. (2020). Phytochemical and Quality Attributes of Strawberry Fruit under Osmotic Stress of Nutrient Solution and Foliar Application of Putrescine and Salicylic Acid. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, *7*(3), 263-278. https://doi.org/10.22059/ijhst.2020.298283.347
20. Hameed, A., Ahmed, M. Z., Hussain, T., Aziz, I., Ahmad, N., Gul, B., & Nielsen, B. L. (2021). Effects of Salinity Stress on Chloroplast Structure and Function. *Cells*, *10*(8), 2023. https://doi.org/10.3390/cells10082023. PMID: 34440792; PMCID: PMC8395010.
21. Jacobsen, S. E., Liu, F., & Jensen, C. R. (2009). Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Horticulturae*, *122*(2), 281-287.
22. Jacobsen, S. E., Monteros, C., Christiansen, J. L., Bravo, L. A., Corcuera, L. J., & Mujica, A. (2005). Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*, *22*, 131-139.
23. Jalil Shesh Bahre, M., & Movahedi Dehnavi, M. (2012). Effect of zinc and iron foliar application on soybean seed vigor grown under drought stress. *Electronic Journal Crop Production*, *5* (1), 19-35.
24. Jamali, S., & Sharifan, H. (2018). Investigation the effect of different Salinity levels on Yield and Yield components of Quinoa (Cv. Titicaca). *Journal of Water and Soil Conservation*, *25*(2), 251-266. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.13721.2841
25. Karlický, V., Kmecová Materová, Z., & Kurasová, I. (2021). Accumulation of geranylgeranylated chlorophylls in the pigment-protein complexes of Arabidopsis thaliana acclimated to green light: effects on the organization of light-harvesting complex II and photosystem II functions. *Photosynthesis Research*, *149*, 233-252. https://doi.org/10.1007/s11120-021-00827-1
26. Keshtkar, A., Aien, A., Naghavii, H., & Najafi Nezhad, H. (2021). Effect of foliar application of jasmonic acid and drought stress on yield and some agronomic and physiologic traits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) cultivars. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *14*(2), 403-414. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22077/escs.2020.2402.1711
27. Khademian, R., Ghassemi, S., & Asghari, B. (2019). Bio-fertilizer Improves Physio-biochemical Characteristics and Grain Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Drought Stress. *Russian Agricultural Sciences*, *45*, 458-463. https://doi.org/10.3103/S1068367419050124
28. Lamochi, S., & Sakinejad, T. (2019). Evaluation Seed Yield, Its Components and Morphological Traits of Corn in Response of Consume Super Absorbent Polymers and Nitroxin. *Journal of Crop Nutrition Science*, *5*(1), 18-32.
29. Moemeni, F., Ghobadi, M., Jalali-Honarmand, S., & Shekaari, P. (2015). The response of physiological

characteristics of chickpea to K and Zn fertilizers under dryland farming and supplementary irrigation conditions. *Journal of Plant Process and Function*, *3*(9), 71-84. (in Persian with English abstract).

30. Mohseni, S. H., Esmaeili, M. A, Pirdashti, H., Abbasi, R., & Nasiri, M. (2020). Effect of potassium fertilizers on chlorophyll florescence and photosynthetic pigments in rice (*Oryza sativa* L. var. Tarom Hashemi) in regulated deficit irrigation condition. *Journal of Plant Process and Function*, *9*(35), 1-22. (in Persian with English abstract).
31. Parkash, V., & Singh, S. (2020). A Review on Potential Plant-Based Water Stress Indicators for Vegetable Crops. *Sustainability*, *12*, 3945. https://doi.org/10.3390/su12103945
32. Ravi, S., Channal, H. T., Hebsur, N. S., Patil, B. N., & Dharmatti, P. R. (2008). Effect of sulphur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Karnataka Journal Agriculture Science*, *32*, 382-385.
33. Salehinia, P. (2019). *The effect of camel manure and manganese sulfate on yield and yield components of foxtail millet*. Master's Thesis, agrotechnology major, agroecology, Faculty of Agriculture, Birjand University. (in Persian with English abstract).
34. Seyed Sharifi, R., Namvar, A., & Seyed Sharifi, R. (2017). Grain filling and fatty acid composition of safflower fertilized with integrated nitrogen fertilizer and biofertilizers. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *52*(04), 236-243. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000400003
35. Shekofteh, H., & Dehghani Fatehabad, R. (2016). Effect of Water Stress and Potassium on Yield and Yield Components of Cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Journal of Plant Physiology and Breeding*, *8*(2), 167-178. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22084/ppt.2016.1863
36. Sofy, M. R., Sharaf, A. E. M., & Fouda, H. M. (2016). Stimulatory effect of hormones, vitamin C on growth, yield and some metabolic, activities of Chenopodium quinoa plants in Egypt. *Journal of Plant Biochemistry and Physiology*, *10*, 2329-9029.
37. Swiatek, A., Azmi, A., Witters, E., & Van Onckelen, H. (2003). Stress Massengers Jsmonic acid and Abccisic acid negatively regulate plant cell cycle. *Journal of Plant Physiology*, 172-178.
38. Talukdar, D. (2013). Comparative morpho-physiological and biochemical responses of lentil and grass pea genotypes under water stress. *Journal of Natural Science, Biology and Medicine*, *4*(2), 396-402. https://doi.org/10.4103/0976-9668.116983
39. Verma, K. K., Song, X. P., Zeng, Y., Li, D. M., Guo, D. J., Rajput, V. D., Chen, G. L., Barakhov, A., & Minkina, T. M. (2020). Characteristics of Leaf Stomata and Their Relationship with Photosynthesis in Saccharum officinarum Under Drought and Silicon Application. *ACS Omega*, *5*, 37, 24145-2415. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03820
40. Wang, Q., Jiang, L., Chen, Y., Tian, X., & Lv, G. (2021). Abiotic stress-by-competition interactions drive hormone and nutrient changes to regulate Suaeda salsa growth. *Global Ecology and Conservation*, *31*, e01845. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01845
41. Waraich, E. A., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., Saifullah, & Ahmad, M. (2011). Improving agricultural water use efficiency by nutrient management in crop plants. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, *61*(4), 291-304. https://doi.org/10.1080/09064710.2010.491954
42. Waraich2012, E. A., Ahmad, R., Halim, A., & Aziz, T. (2012). Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *12*, 221-244.
43. Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae*, *7*, 50. https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050
44. Yousefi, M. (2012). Impact of Zn and Mn foliar application on yield of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) under two irrigation regimes. *International Journal of Agriculture: Research and Review*, *2*(3), 102-107.